

Оценка эффективности сорбции ионов свинца (II) с помощью моделей кинетики и изотермы сорбции

© 2021. С. Г. Скугорева¹, к. б. н., н. с., Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,
Л. И. Домрачева^{1,3}, д. б. н., профессор,
¹Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
²Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
³Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,
e-mail: skugoreva@mail.ru, grigory_kantor@mail.ru, dli-alga@mail.ru

Целью работы было оценить эффективность использования сорбентов различной природы (активированный уголь, цеолит, торф, мицелий *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc., цианобактерия *Nostoc paludosum* Kütz., биоплёнки с доминированием *N. commune*, листья ярового ячменя *Hordeum distichum* L.) по отношению к ионам свинца (II) с использованием моделей кинетики и изотермы сорбции. Установлено, что изотерму сорбции ионов свинца (II) большинством сорбентов хорошо описывает уравнение Фрейндлиха ($r^2 = 0,61-0,993$), которое предполагает неограниченную адсорбцию, а кинетику сорбции – уравнение модифицированной модели второго порядка ($r^2 = 0,90-0,9993$), основанной на том, что процесс сорбции лимитирует реакция ионного обмена и предполагает, что в начальный момент времени адсорбция не равна нулю. Согласно данным моделям, наиболее эффективными сорбентами ионов свинца (II) являются листья растений ячменя и торф, наименее – активированный уголь и цеолит. Сорбенты на основе сухой биомассы микроорганизмов и их биоплёнок имеют среднюю эффективность.

Ключевые слова: сорбция, биосорбенты, ячмень, торф, биоплёнки *Nostoc commune*, *Fusarium culmorum*, *Nostoc paludosum*, кинетика сорбции, изотерма сорбции, ионы свинца (II).

Evaluation of the sorption efficiency of lead(II) ions using models of kinetics and sorption isotherm

© 2021. S. G. Skugoreva¹ ORCID: 0000-0002-5902-5187^{*}

G. Ya. Kantor^{1,2} ORCID: 0000-0002-6462-6702^{*}

L. I. Domracheva^{1,3} ORCID: 0000-0002-7104-3337^{*}

¹Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

³Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrskiy Prospect, Kirov, Russia, 610017,

e-mail: skugoreva@mail.ru, grigory_kantor@mail.ru, dli-alga@mail.ru

The aim of this work was to evaluate the efficiency of using sorbents of different nature (activated carbon, zeolite, peat, mycelium of *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc., cyanobacterium *Nostoc paludosum* Kütz., biofilms dominated by *N. commune*, leaves of spring barley *Hordeum distichum* L.) with respect to lead(II) ions using models of kinetics and sorption isotherm. It was found that the isotherm of sorption of lead(II) ions by most sorbents is well described by the Freundlich equation ($r^2 = 0.61-0.993$), which assumes unlimited adsorption, and the kinetics of sorption is the equation of a modified second-order model ($r^2 = 0.90-0.9993$), based on the fact that the sorption process is limited by the ion exchange reaction and assumes that at the initial moment of time the adsorption is not equal to zero.

In the course of the study, a series of sorbents were built in descending order of sorption capacity in relation to lead ions: according to the kinetic model equation: barley \geq peat $>$ biofilms *N. commune* $>$ *N. paludosum* $>$ *F. culmorum* $>$

activated carbon > zeolite; according to the sorption isotherm equation: barley > peat > biofilms *N. commune* > *N. paludosum* > *F. culmorum* > activated carbon > zeolite.

Thus, the series of sorbents obtained in the description of sorption by the model of sorption kinetics and isotherm completely coincide. The most effective sorbents of lead (II) ions are barley leaves and peat, the least – activated carbon and zeolite. Sorbents based on dry biomass of microorganisms and their biofilms have an intermediate efficiency.

Keywords: sorption, biosorbents, barley, peat, biofilms of *Nostoc commune*, *Fusarium culmorum*, *Nostoc paludosum*, sorption kinetics, sorption isotherm, lead (II) ions.

В настоящее время всё большую актуальность приобретает проблема загрязнения окружающей среды соединениями тяжёлых металлов (ТМ) в связи с их высокой токсичностью, способностью к аккумуляции в живых организмах и устойчивостью [1]. Одним из самых токсичных ТМ является свинец, его ПДК в воде составляет 0,01 мг/л, в почве – 32 мг/кг (СанПин 1.2.3685-21). Поступление избыточных концентраций соединений свинца в организм человека может приводить к заболеваниям центральной нервной и репродуктивной систем, мозга, печени, почек [2].

Наиболее эффективным способом извлечения ТМ из загрязнённых сточных вод и почв является сорбция. Среди сорбционных методов зачастую предпочтение отдаётся биосорбции, которая основана на использовании в качестве сорбентов растений, грибов и различных групп микроорганизмов. Считается, что это наиболее экологически чистая и безопасная технология очистки вод и почв от ТМ [3].

При описании процесса сорбции многие исследователи используют различные математические модели. При этом одни авторы описывают изотерму сорбции, которая представляет собой зависимость количества адсорбированного вещества от концентрации раствора в равновесных условиях. Другие авторы делают акцент на кинетике сорбции, которая отражает зависимость количества адсорбированного вещества от времени процесса в условиях, далёких от равновесных. Тем не менее, в научной литературе есть единичные публикации [4, 5], в которых одновременно при изучении сорбции использовались модели изотермы сорбции и модели кинетики сорбции. Следует отметить, что процесс сорбции является единым процессом, поэтому его изучение с использованием и моделей кинетики, и изотермы сорбции является важным для понимания механизма процесса, подбора наиболее эффективных сорбентов и оптимальных условий проведения сорбции.

Использование потенциометрического метода позволяет в режиме реального времени строить кривые кинетики сорбции ионов ТМ

различными сорбентами, проводить их обработку и сравнить эффективность сорбентов [6, 7].

Ранее нами была дана оценка эффективности сорбентов различной природы по отношению к ионам меди (II) [6]. Наиболее эффективными сорбентами оказались растения ячменя, которые обладали максимальной скоростью сорбции и высокой сорбционной ёмкостью.

Цель работы: оценить эффективность использования сорбентов различной природы по отношению к ионам свинца (II) с использованием моделей кинетики и изотермы сорбции.

Объекты и методы исследования

В ходе исследования в качестве сорбентов использовали [6]: активированный уголь (ЗАО «Медисорб»); природный цеолит сокирнит 1 типа (ООО «Цео-Макс»); торф из месторождения вблизи с. Чистополье (Котельничский район Кировской области); мицелий гриба *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc.; культуру почвенной цианобактерии (ЦБ) *Nostoc paludosum* Kütz. № 18; природные биоплёнки (БП) с доминированием *Noctoc commune* [8]; среднюю часть третьего листа 25-дневных растений ярового ячменя (*Hordeum distichum* L.) сорта Новичок.

Мицелий микромицета и биомассу ЦБ предварительно отмывали от питательной среды, БП *N. commune* – от частиц почвы дистиллированной водой. Все сорбенты высушивали до постоянной массы, измельчали. Измерение содержания ионов свинца (II) в растворе проводили потенциометрическим методом на иономере «Эксперт-001» при температуре 23 °С.

В стакан наливали 50 мл раствора нитрата свинца (II) с концентрациями $0,8 \cdot 10^{-4}$; $1,6 \cdot 10^{-4}$; $3,2 \cdot 10^{-4}$ и $8 \cdot 10^{-4}$ моль/л (М), погружали в раствор магнит, ионоселективный электрод и двухключевой электрод сравнения, включали магнитную мешалку [6]. Запускали программу приёма и обработки данных с иономера EXP2PR (ООО «ЭКОНИКС-ЭКСПЕРТ»). Пробы сухих сорбентов (масса сорбента 50 мг) вносили в стакан с раствором соли свинца.

Для оценки эффективности сорбентов использовали: модели кинетики (псевдо-первого и псевдо-второго порядков, модифицированную модель второго порядка и модель Еловича [6, 9, 10]), уравнения изотерм сорбции (Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича [11–13]).

Значения параметров кинетических моделей и изотерм сорбции, усреднённые за полное время каждого измерения, находили методом наименьших квадратов при помощи надстройки «Поиск решения» программного пакета Microsoft Office Excel. При подборе уравнения изотермы сорбции и модели кинетики рассчитывали коэффициент детерминации r^2 по формуле:

$$r^2 = 1 - \frac{D_1}{D_2}, \quad (1)$$

где D_1 – дисперсия разности экспериментальных и расчётных данных; D_2 – дисперсия экспериментальных данных.

Результаты и их обсуждение

Кинетика сорбции. Для установления модели, оптимально описывающей сорбцию ионов свинца (II) сорбентами, сравнивали коэффициенты детерминации r^2 (табл. 1).

В большинстве случаев сорбцию ионов свинца (II) *F. culmorum* наилучшим образом описывает модифицированная модель

Таблица 1 / Table 1

Результаты обработки (r^2) кинетических кривых сорбции Pb^{2+} моделями химической кинетики
The results of processing (r^2) of the kinetic curves of sorption of Pb^{2+} models of chemical kinetics

Сорбент Sorbent	Модель псевдо-первого порядка Pseudo-first order model	Модель псевдо-второго порядка Pseudo-second order model	Модифицированная модель второго порядка Modified second order model	Модель Еловича Elovich's model
$0,8 \cdot 10^{-4}$ моль/л / mol/L $Pb(NO_3)_2$				
<i>F. culmorum</i>	0,91	0,999**	0,999**	0,64
<i>N. paludosum</i>	0,97	0,98**	0,98**	0,72
Биоплёнки / Biofilms	0,997**	0,99*	0,99*	0,93
Цеолит / Zeolite	0,92	0,98	0,99*	0,996**
$1,6 \cdot 10^{-4}$ моль/л / mol/L $Pb(NO_3)_2$				
<i>F. culmorum</i>	0,92	0,997*	0,998**	0,91
<i>N. paludosum</i>	0,992**	0,99*	0,99*	0,93
Биоплёнки / Biofilms	0,992**	0,98*	0,98*	0,95
Ячмень / Barley	0,98**	0,94*	0,94*	0,42
Торф / Peat	0,997**	0,94*	0,94*	0,47
АУ / AC	0,87	0,96	0,99*	0,993**
Цеолит / Zeolite	0,90	0,95	0,99**	0,99*
$3,2 \cdot 10^{-4}$ моль/л / mol/L $Pb(NO_3)_2$				
<i>F. culmorum</i>	0,87	0,96*	0,97**	0,86
<i>N. paludosum</i>	0,78	0,96*	0,98**	0,94
Биоплёнки / Biofilms	0,98	0,997**	0,997**	0,94
Ячмень / Barley	0,94	0,99**	0,99**	0,62
Торф / Peat	0,97	0,98**	0,98**	0,73
АУ / AC	0,81	0,92	0,97*	0,99**
Цеолит / Zeolite	0,90	0,94	0,98**	0,98*
$8 \cdot 10^{-4}$ моль/л / mol/L $Pb(NO_3)_2$				
<i>F. culmorum</i>	0,55	0,84	0,90*	0,94**
<i>N. paludosum</i>	0,88	0,97	0,99*	0,997**
Биоплёнки / Biofilms	0,99	0,9993**	0,9993**	0,98
Ячмень / Barley	0,76	0,96*	0,98**	0,86
Торф / Peat	0,98	0,99**	0,99**	0,83

Примечание: АУ – активированный уголь; * – высокие значения; ** – максимальные значения.
Note: AC – activated carbon; * – high values; ** – maximum values.

второго порядка. Лишь при самой высокой концентрации нитрата свинца в растворе ($8 \cdot 10^{-4}$ М) наиболее приемлемой оказалась модель Еловича.

Для ЦБ *N. paludosum* применимость моделей сорбции ионов свинца зависела от начальной концентрации ионов свинца. Так, при $0,8 \cdot 10^{-4}$ и $3,2 \cdot 10^{-4}$ М процесс хорошо описывает уравнение модифицированной модели второго порядка, при $1,6 \cdot 10^{-4}$ М – модель псевдо-первого порядка, при $8 \cdot 10^{-4}$ М – модель Еловича.

Сорбция свинца БП с доминированием *N. commune* при низких концентрациях ионов в растворе ($0,8 \cdot 10^{-4}$ и $1,6 \cdot 10^{-4}$ М) адекватно описывает модель псевдо-первого порядка, при более высоких концентрациях ($3,2 \cdot 10^{-4}$ и $8 \cdot 10^{-4}$ М) – модель псевдо-второго и модифицированная модель второго порядка.

Для характеристики сорбции свинца листьями растений ячменя и торфом в большинстве случаев наиболее оптимально использование уравнения модифицированной модели второго порядка. Однако при концентрации нитрата свинца $1,6 \cdot 10^{-4}$ М отмечаются максимальные значения коэффициента детерминации для уравнения псевдо-первого порядка.

Для активированного угля процесс сорбции наилучшим образом описывает модель Еловича. Высокие значения по данной модели отмечаются и для другого неорганического сорбента – цеолита, хотя максимальные значения r^2 отмечаются для модели модифицированного второго порядка. Полученные данные свидетельствуют о том, что поверхность данных сорбентов не является однородной.

Таким образом, для описания кинетики сорбции ионов свинца большей частью сорбентов наиболее приемлемой оказалась модифицированная модель второго порядка ($r^2 = 0,90-0,9993$). Данная модель предполагает, что процесс сорбции лимитирует реакция ионного обмена, сорбат и функциональная группа сорбента взаимодействуют между собой в соотношении 1 : 1 [9].

В основе модифицированной модели второго порядка лежит уравнение:

$$a_t = a_e \cdot \left(1 - \frac{1}{b + k_2' t} \right), \quad (2)$$

где a_t и a_e – удельная и равновесная (предельная) удельная масса сорбата соответственно (ммоль/г или мг/г), k_2' – константа скорости сорбции модифицированной модели

второго порядка (c^{-1}), b – поправочный коэффициент.

Скорость сорбции ионов свинца (II) сорбентом возрастает с ростом значений кинетического коэффициента (k_2'); сорбционная ёмкость – с увеличением равновесной (предельной) удельной массы сорбата (a_e). Модифицированная модель второго порядка учитывает то, что адсорбция в начальный момент времени происходит мгновенно, поэтому она не равна нулю, в связи с чем вводится поправочный коэффициент b ($b \geq 1$):

$$b = \frac{1}{1 - \theta_0}. \quad (3)$$

Исходя из значений b , рассчитывали начальное покрытие поверхности сорбента θ_0 , которое равно отношению a_0/a_e [10]. Параметры модели модифицированного второго порядка для сорбентов при различных начальных концентрациях нитрата свинца (II) в растворе представлены в таблице 2.

Судя по кинетическому коэффициенту, высочайшей скоростью сорбции обладали листья ячменя, на порядок меньше была скорость сорбции для торфа. Средними значениями скоростей характеризовались сухая биомасса микромицета *F. culmorum* и цианобактерии *N. paludosum*. Относительно низкие значения кинетического коэффициента k_2' получены для активированного угля, цеолита и БП.

Между кинетическим коэффициентом и начальной концентрацией ионов свинца в растворе существует обратная корреляционная зависимость, сила которой была достаточно высока для растений ячменя ($r = -0,999$), торфа ($r = -0,996$) и цеолита ($r = -0,95$). Для остальных сорбентов коэффициент корреляции варьировал в пределах от $-0,67$ до $-0,61$. Отрицательные значения коэффициента корреляции означают, что с увеличением начальной концентрации ионов свинца в растворе относительная скорость сорбции снижается.

Полученные значения равновесной удельной массы сорбата свидетельствуют о высокой сорбционной ёмкости листьев растений ячменя и торфа, средних ёмкостях ЦБ и БП. Несколько ниже была ёмкость для биомассы *F. culmorum* как сорбента ионов свинца. При этом полученное значение ёмкости сорбции данным видом фузариума ($0,098$ ммоль/г) хорошо согласуется с ранее полученным значением ($0,099$ ммоль/г) [14]. Низкими значениями показателя характеризовались цеолит и активированный уголь. Для всех сорбентов

Таблица 2 / Table 2

Параметры модифицированной модели сорбции второго порядка для сорбентов при разных начальных концентрациях ионов свинца в растворе
Parameters of the modified second-order model of sorption for sorbents at different initial concentrations of lead ions in solution

Начальная концентрация Initial concentration Pb(NO ₃) ₂ , моль/л / mol/L	Сорбент Sorbent	k_2' , · 10 ⁻³ с ⁻¹	a_e , мг/г сорбента mg/g sorbent	b	Θ_0
0,8 · 10 ⁻⁴	<i>F. culmorum</i>	66,06	16,28	1,0000	0,0000
	<i>N. paludosum</i>	31,98	16,81	1,0000	0,0000
	биоплёнки / biofilms	2,20	17,92	1,0000	0,0000
	цеолит / zeolite	3,35	12,11	1,1706	0,1458
1,6 · 10 ⁻⁴	<i>F. culmorum</i>	9,28	29,00	1,0690	0,0646
	<i>N. paludosum</i>	4,91	35,93	1,0000	0,0000
	биоплёнки / biofilms	1,18	39,18	1,0000	0,0000
	ячмень / barley	278,91	31,11	1,0000	0,0000
	торф / peat	22,76	33,07	1,0000	0,0000
	АУ / AC	2,87	26,76	1,2439	0,1961
	цеолит / zeolite	1,97	16,22	1,2227	0,1822
3,2 · 10 ⁻⁴	<i>F. culmorum</i>	12,18	42,37	1,0980	0,0893
	<i>N. paludosum</i>	3,16	60,89	1,2739	0,2150
	биоплёнки / biofilms	3,40	63,39	1,0000	0,0000
	ячмень / barley	202,92	68,97	1,0000	0,0000
	торф / peat	16,29	67,64	1,0000	0,0000
	АУ / AC	5,22	29,37	1,3288	0,2475
	цеолит / zeolite	1,09	26,49	1,1971	0,1646
8 · 10 ⁻⁴	<i>F. culmorum</i>	4,52	61,13	1,6859	0,4068
	<i>N. paludosum</i>	1,64	94,69	1,1964	0,1642
	биоплёнки / biofilms	1,00	107,55	1,0000	0,0000
	торф / peat	3,48	165,83	1,0000	0,0000

Примечание / Note: АУ – активированный уголь / AC – activated carbon.

установлена высокая корреляционная связь между равновесной удельной массой сорбата и начальной концентрацией ионов свинца в растворе: $r = 0,96-0,9999$, т. е. с увеличением начальной концентрации ионов свинца в растворе сорбционная ёмкость всех сорбентов увеличивается.

Ранее, при исследовании сорбции ионов меди (II) этими же сорбентами, показано [6], что кинетика процесса также, как и для ионов свинца, хорошо описывается моделью псевдо-второго порядка и модифицированной моделью второго порядка. Ряд сорбентов по снижению сорбционной ёмкости ионов меди имел тот же вид, что и для свинца. Абсолютные значения равновесной удельной массы для меди составляли 0,16–0,32, для свинца – 0,017–0,049 ммоль/г сорбента, что на порядок меньше. Таким образом, исследуемые сорбенты лучше сорбируют ионы меди, чем ионы свинца.

Для цеолита и активированного угля, а также фузариума и ЦБ при относительно высоких начальных концентрациях ионов свинца в растворе коэффициент b был больше единицы, начальное покрытие сорбатом поверхности сорбента Θ_0 составляло от 6,50 до 40,68% от предельной удельной массы сорбата. Это означает, что в начальный момент времени адсорбция ионов свинца из раствора не равна нулю, поэтому в данных случаях наиболее приемлемо уравнение модифицированной модели второго порядка, а не псевдо-второго порядка.

Изотермы сорбции. Равновесие в адсорбционной системе зависит от природы взаимодействия адсорбент – адсорбат. Изотермы адсорбции описывают это взаимодействие по-разному [15]. Модель Ленгмюра хорошо описывает адсорбцию на мономолекулярном слое, модель Фрейндлиха – неограниченную адсорбцию на гетерогенных поверхностях

Таблица 3 / Table 3

Результаты обработки (r^2) сорбции ионов свинца уравнениями изотермы адсорбции
Results of processing (r^2) sorption of lead ions by equations of adsorption isotherm

Сорбент / Sorbent	Уравнение Ленгмюра Langmuir's equation	Уравнение Фрейндлиха Freundlich's equation	Уравнение Дубинина-Радушкевича Dubinin-Radushkevich's equation
<i>F. culmorum</i>	0,94*	0,993**	0,76
<i>N. paludosum</i>	0,80*	0,94**	0,80
Биоплёнки / Biofilms	0,95*	0,97**	0,45
Торф / Peat	0,998*	0,97	0,9996**
Цеолит / Zeolite	0,39	0,61**	0,31

Примечание: * – высокие значения, ** – максимальные значения.
Note: * – high values, ** – maximum values.

Таблица 4 / Table 4

Параметры модели Фрейндлиха для различных сорбентов
Freundlich model parameters for various sorbents

Сорбент / Sorbent	K_F , л/мг / L/mg	$1/n$
Ячмень / Barley	110,45	0,248
Торф / Peat	100,11	0,198
<i>N. paludosum</i>	47,21	0,152
Биоплёнки / Biofilms	37,98	0,225
<i>F. culmorum</i>	20,52	0,262
Активированный уголь / Activated carbon	17,70	0,172
Цеолит / Zeolite	9,14	0,300

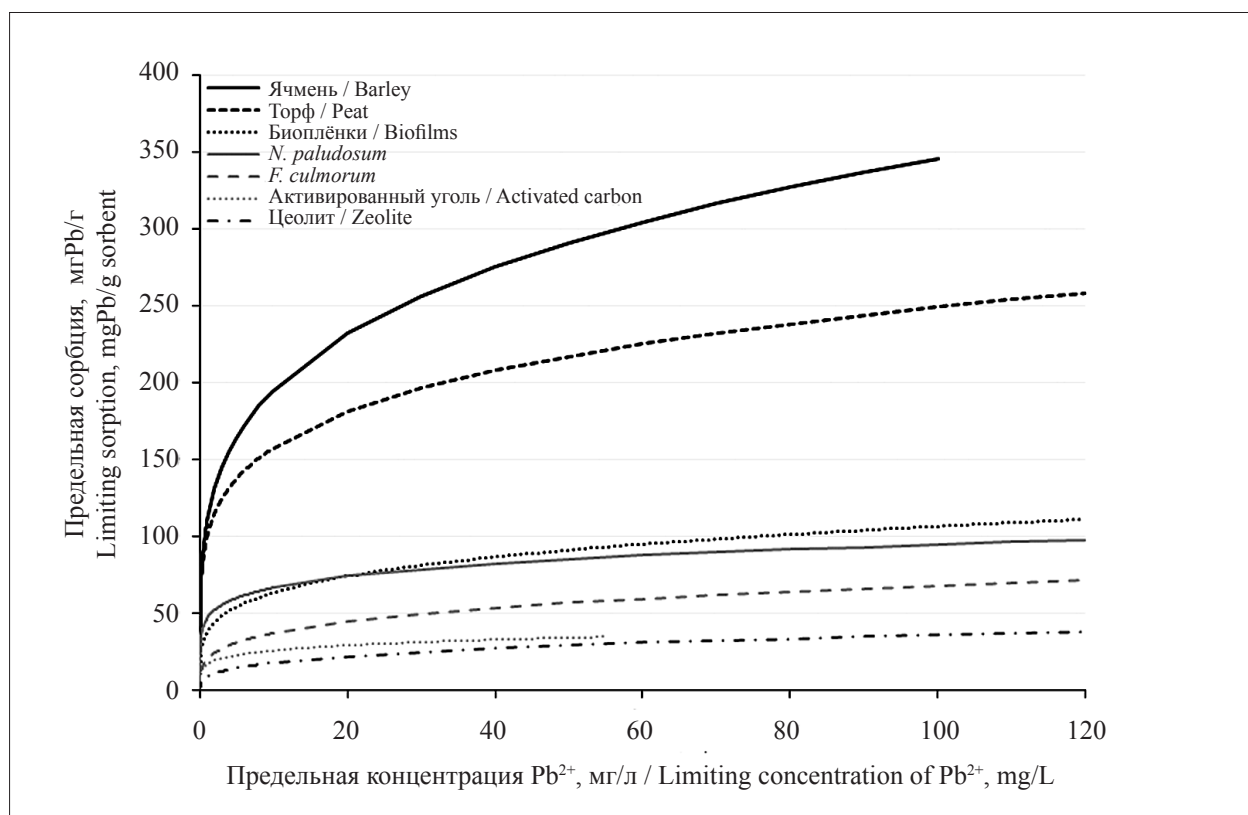


Рис. Изотермы сорбции Фрейндлиха для сорбентов различной природы
Fig. Freundlich sorption isotherms for sorbents of different nature

в нескольких слоях, модель Дубинина-Радушкевича – адсорбцию на тонкопористых сорбентах. При выполнении работы были построены изотермы адсорбции по экспериментальным данным и проведён подбор теоретической модели, которая бы наиболее оптимально описывала сорбцию.

Как видно из данных таблицы 3, для большинства сорбентов максимальные и высокие значения коэффициента детерминации установлены для уравнения Фрейндлиха. Уравнения Ленгмюра и Дубинина-Радушкевича оказались наиболее приемлемы для описания сорбции ионов свинца торфом.

Так как для исследуемых сорбентов получены максимальные и высокие значения r^2 (0,61–0,993) по уравнению Фрейндлиха, рассмотрим его параметры (табл. 2). Количество адсорбированного вещества возрастает пропорционально корню n -ой степени из концентрации раствора [16]:

$$A = K_F \cdot c_e^{1/n}, \quad (4)$$

где A – масса адсорбированных ионов свинца на 1 г сорбента (ммоль/г или мг/г), c_e – равновесная концентрация адсорбата (ммоль/л или мг/л), K_F и $1/n$ – константы, определяемые экспериментальным путём.

Ранее [5] было показано, что сорбция ионов меди(II) сухой биомассой плодовых тел высших грибов шампиньона двуспорового *Agaricus bisporus* и сыроежки волнистой *Russula atropurpurea* также хорошо описывается данной моделью.

Согласно модели, в первую очередь заполняются сорбционные центры с более сильной связывающей способностью, и прочность поглощения уменьшается с увеличением степени заполнения. Изотерма сорбции Фрейндлиха не имеет зоны насыщения и используется для описания сорбции из растворов с малыми и средними концентрациями [17].

K_F – константа равновесия, относящаяся к адсорбционной ёмкости. Физический смысл K_F состоит в том, что она соответствует величине адсорбции при равновесной концентрации 1 моль/л. Постоянная K_F зависит от природы адсорбента и адсорбата.

Как видно из данных таблицы 4, наибольшие значения K_F установлены для листьев растений ячменя и торфа. Для ЦБ *N. paludosum* и БП с доминированием *N. commune* определены средние значения константы Фрейндлиха. Несколько ниже значения для микромицета *F. culmorum* и активиро-

ванного угля. Минимальная величина K_F характерна для цеолита.

Второй константой уравнения Фрейндлиха является коэффициент неоднородности $1/n$, который указывает на интенсивность взаимодействия адсорбент – адсорбат. При «благоприятной» адсорбции ионов на адсорбенте значение $1/n$ лежит в пределах от 0,1 до 1 [18, 19]. В нашем исследовании значения коэффициента неоднородности составляют 0,172–0,300, что указывает на хорошую адсорбцию ионов свинца.

Согласно изотермам сорбции, построенным по уравнению Фрейндлиха, ряд сорбентов по снижению сорбционной способности выглядит так: ячмень > торф > биооплётки *N. commune* > *N. paludosum* > *F. culmorum* > активированный уголь > цеолит (рис.).

Заключение

Изотерму сорбцию ионов свинца(II) большей части исследованных сорбентов хорошо описывает уравнение Фрейндлиха, которое предполагает неограниченную адсорбцию, а кинетику сорбции описывает уравнение модифицированной модели второго порядка, которое основано на том, что химическая реакция обмена лимитирует процесс сорбции и предполагает то, что в начальный момент времени адсорбция не равна нулю.

В ходе исследования были построены ряды сорбентов по снижению ёмкости сорбции по отношению к ионам свинца:

– по уравнению модели кинетики: ячмень \geq торф > биооплётки *N. commune* > *N. paludosum* > *F. culmorum* > активированный уголь > цеолит;

– по уравнению изотермы сорбции: ячмень > торф > биооплётки *N. commune* > *N. paludosum* > *F. culmorum* > активированный уголь > цеолит.

Таким образом, ряды сорбентов, полученные при описании сорбции моделью кинетики и изотермы сорбции, полностью совпадают. Согласно им, наиболее эффективными сорбентами ионов свинца(II) являются листья ячменя и торф, наименее – активированный уголь и цеолит. Сорбенты на основе сухой биомассы микроорганизмов и их БП имеют среднюю эффективность.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформи-

References

1. Skugoreva S.G., Ashihmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I. Chemical grounds of toxic effect of heavy metals (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2016. No. 1. P. 4–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-014-019
2. Saruchi Sh., Kumar V. Adsorption kinetics and isotherms for the removal of rhodamine B dye and Pb²⁺ ions from aqueous solutions by a hybrid ion-exchanger // *Arabian Journal of Chemistry*. 2019. V. 12. No. 3. P. 316–329. doi: 10.1016/j.arabjc.2016.11.009
3. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I. Biosorption of heavy metals by micromycetes: specificity of the process, mechanisms, kinetics // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 2. P. 14–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-014-031
4. Alghamdi A.A., Al-Odayni A.B., Saeed W.S., Al-Kahtani A., Alharthi F.A., Aouak T. Efficient adsorption of lead(II) from aqueous phase solutions using polypyrrole-based activated carbon // *Materials (Basel)*. 2019. V. 12. Article No. 2020. doi: 10.3390/ma12122020
5. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Zhukova A.V. The use of mathematical models to assess the sorption abilities of higher mushrooms and activated carbon in relation to copper(II) ions // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 2. P. 44–50 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-044-050
6. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Kutuyavina T.I. Comparative analysis of the effectiveness of the use of sorbents of different nature with respect to copper(II) ions // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 3. P. 12–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-012-018
7. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Zhukova A.V., Ashihmina T.Ya. Mushrooms as sorbents of cadmium ions // *Butlerov Communications*. 2019. V. 60. No. 12. P. 140–145 (in Russian). doi: 10.37952/ROI-jbc-01/19-60-12-140
8. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Pegushina O.A., Fokina A.I. Biofilms *Nostoc commune* – a special microbial sphere // *Theoretical and Applied Ecology*. 2007. No. 1. P. 15–19 (in Russian).
9. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // *Separ. Purif. Methods*. 2000. V. 29. No. 2. P. 189–232. doi: 10.1018/SPM-100100009
10. Cheung W.H., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetic analysis of the sorption of copper(II) ions on chitosan // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2003. V. 78. No. 5. P. 562–571. doi: 10.1002/jctb.836
11. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum // *Journal of the American Chemical Society*. 1918. V. 40. No. 9. P. 1361–1403. doi: 10.1021/ja02242a004
12. Freundlich H.M.F. Over the adsorption in solution // *J. Phys. Chem.* 1906. V. 57. P. 385–471.
13. Dubinin M.M., Radushkevich L.V. Equation of the characteristic curve of activated charcoal // *Proc. Acad. Sci. U.S.S.R. Phys. Chem. Sect.* 1947. V. 55. P. 331.
14. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Sheshegova T.K. Assessment of sorption abilities of various species of *Fusarium* micromycetes in relation to heavy metal ions // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 4. P. 102–109 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-103-109
15. Ayawei N., Ebelegi A.N., Wankasi D. Modelling and interpretation of adsorption isotherms // *Hindawi Journal of Chemistry*. 2017. V. 2017. Article No. 3039817. doi: 10.1155/2017/3039817
16. Workshop on physical chemistry NSU. Chemical thermodynamics and kinetics. Adsorption from solutions on a solid surface / Compiled by O.V. Netskina. Novosibirsk: RITs NSU, 2015. 17 p. (in Russian).
17. Ayawei N., Ekubo A.T., Wankasi D., Dikio E.D. Adsorption of congo red by Ni/Al-CO₃: equilibrium, thermodynamic and kinetic studies // *Oriental Journal of Chemistry*. 2015. V. 31. No. 30. P. 1307–1318.
18. Mouni L., Merabet D., Bouzaza A., Belkhiri L. Adsorption of Pb(II) from aqueous solutions using activated carbon developed from Apricot stone // *Desalination*. 2011. V. 276. P. 148–153. doi: 10.1016/j.desal.2011.03.038
19. Weber T.W., Chakravorti R.K. Pore and solid diffusion models for fixed-bed adsorbents // *Aiche J.* 1974. V. 20. P. 228–238. doi: 10.1002/aic.690200204